

近畿地方の重力探査データのコンパイル

西 田 潤 一

1) はじめに

重力探査にはその性質上、測定地点の正確な緯度、経度および高度のデータが必要である。特に測定地点の高度は水準測量で決定される必要があるために、詳細な重力異常の分布図を作成するためには多大な労力を要する。このために、詳細な重力探査のデータは、狭い地域内毎に独立して行われ報告されている例が多い。これらのデータはその性質上時間とともに変動することは希であり、かなり古いものでも新しく測定されたものとそれほどの誤差はないと考えられる (Satomura, 1985)。

その一方でこれらのデータのまとめかたは報告の時期や報告者によって大きく異なっている。近年のコンピューターの発達により多くのデータを取り扱うことが可能になっているために、これらのデータをまとめていつでも取り出せるようにすることが望まれている。このためには上に述べたような異なったまとめかたのデータを統一した形にする必要がある。

広域の重力異常図を作成することは、第四紀の地殻変動、特に平野部で厚い堆積層の下に隠された潜在断層の存在を明らかにすると考えられる。実際、日本の活断層 (活断層研究会編、1980) にまとめられた活断層分布図には、大阪平野や近江平野のような被覆の厚いところの活断層は山岳部に比較してあまり多く描かれていない。このことは、平野部では活断層が少ないことを意味しているのではなく、従来の地表地質調査では、明らかにすることができなかったことによるものであると考えられる。

筆者はこの10年ほどにわたって近江盆地を中心とした重力測定を行ってきたのでこの蓄積されたデータにその周辺部の測定結果を加えて、必要に応じてデータを取り出せるようにすることを目的としてこの研究を行った。

ここではデータの収録方法を最初に説明した後に、その利用方法を広域の重力分布図の場合およびせまい地域、この場合には二万五千分の一の地形図一枚を例にとって説明する。

2) 収録方法

a) ブーゲー異常

ブーゲー異常は次の式で与えられる。

$$\Delta g_0'' = g + 0.3086H - 2\pi G\rho H + T + Ac - \gamma_0 \quad (\text{mgal}) \quad \cdots(1)$$

ここで $\Delta g_0''$: ブーゲー異常、 g : 絶対重力値、 0.3086 : 重力の鉛直勾配 (単位 mgal/m)、

H：重力測定点の海拔高度（単位 m）、G：万有引力定数、 ρ ：測定点周辺の岩石の平均密度、T：地形補正值、Ac：大気質量補正值、 γ_0 ：標準重力値である。

過去の重力測定データは現在のようにコンピューターが発達することを想定していないために、そのまとめかたは報告者によって、ときによってはその目的によって異なっている。いちばん多い例は重力測定値の位置が地形図の上に示されているのみでその緯度経度が読み取られていないことがあげられる。このようなケースでは元の地形図からその緯度、経度の読み取りを行わねばならない。

普通の重力測定では、絶対重力値は1 mgal の100分の1までの精度があり、これに対応する高度補正およびブーゲー補正を行うためには海拔高度は ± 3 cmの精度を必要とする。一方ブーゲー異常の算出のためには標準重力を差し引くことによって重力の緯度効果を消去する必要がある。標準重力は測定点の緯度のみの関数であるが、上記の絶対重力値の精度に対応するためには1秒（約30m）の10分の1まで緯度を読み取る必要がある。

次に重力値のデータのシステムは1971年の国際測地委員会の決議によってそれまでのポツダム系から1971年系（IGSN '71）へと移行しているが、日本ではその移行以後もポツダム系が用いられているケースがあり、その場合には絶対重力値を1971年系へ再計算する必要がある。この再計算には京都大学理学部地質鉱物学教室地下の国際原点の重力値を979, 707.27 mgal として計算を行った。

この絶対重力値系の移行に伴って標準重力値はそれまでの1924年系から測地基準系1967年へと変更される。

b) 地形補正值

以上に述べた重力異常の計算法のなかで、地形補正の項がいちばん問題になる。なぜならばこの項は測定した場所毎に異なり、しかも推定される地殻の平均密度によって異なるからである。過去のデータの場合には近距離のみしか補正されていないケースや、まったく地形補正のないケースがままある。さらに地形図から読み取り、計算する方法が異なっているため、これまでの地形補正值はすべて無視して次のような方法で統一的な地形補正計算をおこなった。

現在では日本全国のメッシュ状の標高データが国土地理院によってKS-110-1として利用することができるので、この標高データを用いて大型計算機を用いて地形補正計算をする方法が野崎（1981）、河野、久保（1983）桂、西田、西村（1987）によって開発されている。この研究では筆者等の開発した方法（桂等）に従ってすべての重力測定点の地形補正計算を行うことにした。詳しい方法は彼らの論文によればいいのであるが、ここでは必要なことのみを述べることにする。

国土地理院は日本全国を標準地域メッシュに分けている。第一次地域メッシュは、二十万分の一地形図に対応し、その西南隅の緯度の1.5倍および経度の下二桁をコード番号としてあたえるものである。例えば二十万分の一「岐阜」のコードは緯度、経度（35°20′、136°）

に対応して 5336 とあたえられる。第二次地域メッシュは二万五千分の一地形図に対応し、二十万分の一地形図を緯度方向、経度方向にそれぞれ八等分したものを 0 から 7 までの数字であらわしたコードをあたえる。この一次および二次の地域メッシュの概念図は Fig.1 に示してあるが、例えば二万五千分の一「木之本」のメッシュコードは 533621 と与えられる。第三次メッシュはこの第二次地域メッシュをさらに緯度方向、経度方向に 10 等分してそのコードを第二次メッシュコードの下に付け加えたものである。

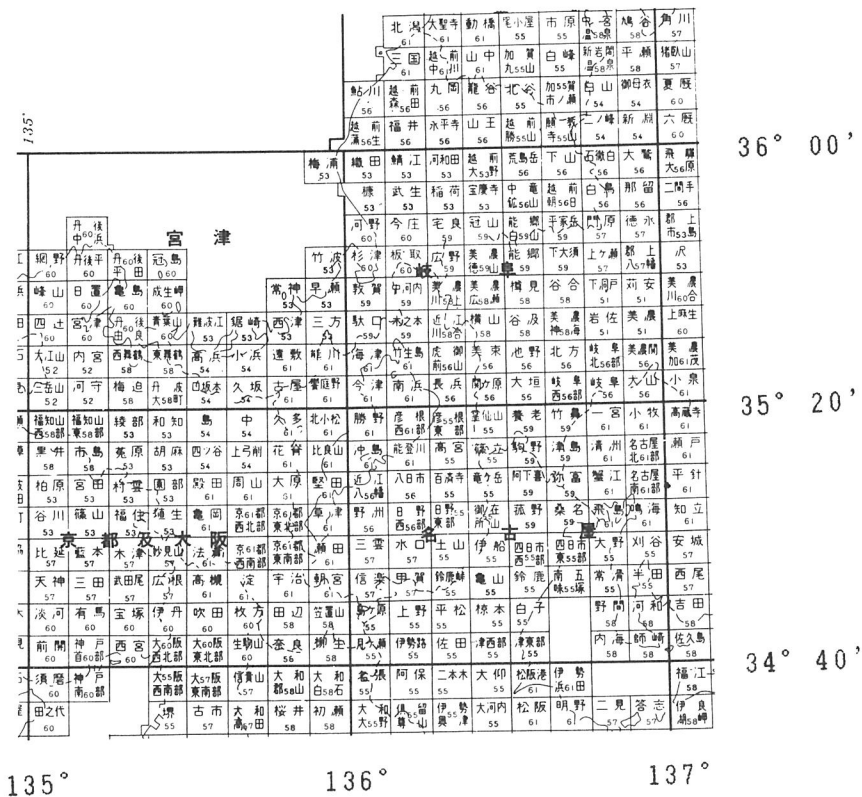


Fig.1 The conception of first and second order mesh code of GSI. First order and second order meshcode corresponds to the 1/200,000 topographic map and to the 1/25,000 topographic map respectively.

KS-110-1 標高データはこの第三次地域メッシュをさらに4等分した $\frac{1}{4}$ 地域メッシュの境界の格子点ごとにその標高値が与えられている。標高データの間隔は経度方向に7.5”、緯度方向に11.25”である。日本の中央部(35°N)付近ではそれぞれ約230mと約280mになるので250mメッシュとよぶ。測定点より遠方では次に述べるように地形メッシュを粗くするようにしたので、KS110-1 標高データから第三次地域メッシュ(30”×45”：約1kmメッシュ)ごとの平均標高をもとめてまえもって用意しておく。

この標高データを用いて地形補正計算を行うに際しては、計算時間を速くするために重力値に及ぼす地形の影響の大きい近距離ではより近似の良い計算を行い、影響の小さい遠距離では近似の粗い計算式を用いることにした。具体的には、測定点の近傍から順に、処理方法を次に述べるように距離とともに変化させる。

(1) 最近傍では五面体近似による厳密解の計算をおこなう。

(2) (1)より外側では地形を $\frac{1}{4}$ 地域メッシュの角柱で近似し、近傍では、Banerjee & Gupta (1977) によって与えられた解析解 (BG式) で計算し、遠方ではすべての質量が角柱の中心にあるとして計算した線質量式 (LMM式) で計算する。ここでBG式からLMM式に切り替える距離は測定点から2 kmであり、それより、6 kmまでは $\frac{1}{4}$ 地域メッシュの角柱をLMM式を用いて計算する。

(3) 重力測定点から第三次地域メッシュの中心までの距離 50km まで、ここで(1)および(2)で計算した地域は除く、この範囲ではまえもって用意した第三次地域メッシュごとの平均標高データを用いて、LMM式で引力の計算を行う。

この補正地域の6 km より近傍の区分の概念図をFig.2 にしめす。図の中央部の黒く塗りつぶされた地域内が(1)に述べた範囲でありこのなかに測定点が存在し、ここではその近傍の四つの隅の地形高度に対応した四つの五面体で地形補正を行う。次に図の中心より2 km 内が(2)で述べたBG式の適用範囲であるが、実際にはかなり歪んだ擬円形になる。その外側6 km までは $\frac{1}{4}$ 地域メッシュのLMM式の適用範囲である。この外側では中心距離50km まで(3)に述べた方法で補正する。

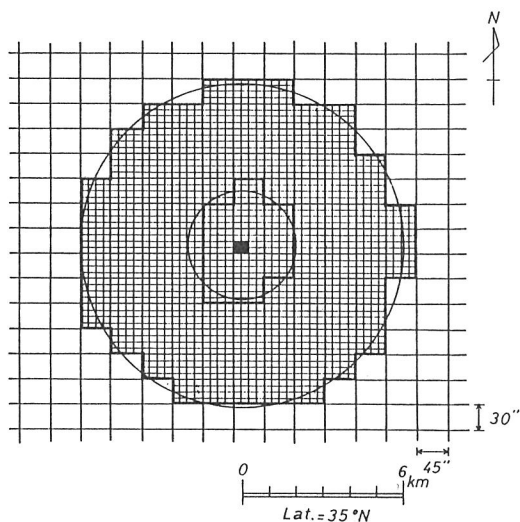


Fig. 2 Regions of terrain correction centered on the gravity station. The arids consists of the third and $\frac{1}{4}$ regional meshes. Two concentric radii centered on the gravity station have the radii of 2 km inner and 6 km outer respectively.

なおここで地形補正計算の打ち切り範囲を50kmとしたのは打ち切り距離をいろいろ変えて地形補正值を求めてみると、打ち切り距離が増大すれば当然地形補正值も大きくなるが、ほぼ40km以上では各重力測定点での地形補正值がほぼ一樣になることによる。

この打ち切り範囲より遠方の補正計算上の誤差を切断誤差という。小竹、萩原（1987）は地球全体の地形補正を行うながら、日本近傍ではブーゲー異常図が我々の見慣れたものとなり異なってくる可能性を示唆している。さらに彼らの見解では日本列島では太平洋の海底地形の影響でこの切断誤差がある傾きをもっているとしてその補正計算式を提唱している。しかしながらここで扱う範囲は彼らの考えるよりはかなり狭いので、ここでは切断誤差は考慮の外におくことにする。

地形補正計算には従来は地球表面を平面と考えて行ってきたが、球面であることの効果は決して無視できない。いまここで採用している地形補正計算法には、必要におうじて平面、球殻での選択が可能である。この研究ではすべての重力データの同一規格での収録を目的としているので、球殻での地形補正法を採用した。

なおこの方法には、以上述べたほかに測定点の近傍の複雑な地形を測定者のフィールドノートから読み取って補正するプログラムが用意されている。しかしながら、いまここでは測定者および測定年代のことになったデータを扱っているので、この方法は採用せずにすべて五面体近似の方法を用いることにした。

なおここで扱っているデータのなかには琵琶湖底での測定データがあり、このデータにたいしては琵琶湖の水の質量の影響の補正が必要である。ここためには琵琶湖底の水深データが必要である。国土地理院のKS-110-1 地形データには湖底の水深データは与えられていないので、国土地理院発行の湖沼図からKS110-1のグリッドに対応する水深を読み取った。琵琶湖底での測定データに対してはこの水深データに対応する地形補正を施した。しかしながら琵琶湖周辺の陸上の測定点には、湖面の高さはすべて85mとして、湖水の補正はなされていない。

c) データの収録方法

ブーゲー異常を求める重力データとして必要なものは、測定点の番号、絶対重力値、測定点の緯度、経度、海拔高度である。そのほかにその後の処理および計算から導かれる量としては、高度補正值、ブーゲー補正值、地形補正值、大気質量補正值および標準重力値である。またこのほかに、測定点の正確な位置が地形図上に示されていなければならない。

ここで標準重力値は緯度の関数であるために、つぎに示す1967年の標準重力式から求めることができる。

$$\gamma = 978.03185 (1 + 0.005278895 \sin^2 \phi + 0.000023462 \sin^4 \phi) \text{ (gal)} \quad (2)$$

高度補正值は、(1)式の $0.3086 H$ (mgal) であり、ブーゲー補正值は同式の $2\pi G \rho H$ で表される項であるので、高度のデータと地表の岩石の平均密度が与えられれば計算によって求められることになる。大気質量補正值 A_c はつぎの式であたえられる。

$$A_c = 0.78 - 0.0000965 H \text{ (mgal)} \quad \cdots (3)$$

地形補正值はすでに述べたように、大型計算機を用いて求められねばならないので、これは京都大学の大型計算機であらかじめ計算しておく。

ブーゲー補正值と地形補正值はともに測定点周辺の岩石の密度に比例する量であるが、この値は地域ごとの周辺の地質分布によって異なる。例えば普通地殻の岩石の平均密度として 2.67 g/cm^3 とされているが、未固結の堆積物ではしばしば 2.0 g/cm^3 前後の値をとることがある。特にこの研究の対象である近畿地方には第四紀更新統が広く分布している。従って岩石の密度をいろいろと変化させてブーゲー異常をもとめてみる必要がある。そこでここでは地形補正值はすべて密度 1.0 g/cm^3 での計算値を収録しておくことにした。

測定点の分布図は、二万五千分の一の地形図に書き込むことによって整理しておく。ときには同一地形図の上に異なった測定者のデータが入ることになるが、原則として測点番号は同一の番号がでてこないかぎり、元の番号を用いることにして、番号のつけ替えは行わないことにしている。もしも同一の番号が出現したときにはその番号の上にその地域ないしは測定者を特定する記号をつけることにした。

収録したデータは PC-9800 パソコンをもちいてフロッピーディスクの上に記憶させておくことにする。フロッピーディスク上にいれる情報はこれまでに述べたことから測定点の番号、緯度、経度、海拔高度、絶対重力値、密度 1.0 g/cm^3 での地形補正值および標準重力値である。実際には Table.1 に示す例のような形でフロッピーディスク内に収録されることになる。なお、ここで緯度、経度のデータは度分秒の単位で読み取っているがテーブルの構成の都合上小数点一個でかきあらわしてある。従って、例えば緯度 35.43325 とかかれた場合には $35^{\circ}43'32.5''$ のことである。海拔高度のデータは m 単位であり、cm までしめしてある。ときにはこの高度が m 単位までしか与えられていないデータがあるが、その場合には測定点の番号に * マークのつけ区別することとした。

St.No	LAT ' ' "	LONG ' ' "	HEIGHT (m)	G-value (mgal)	Nor.G-value (mgal)	T.C.(1 (mgal)
				979	979	
BLN1	35.15030	136.16060	100.490	700.22	754.22	0.22
BLN3	35.16318	136.17084	100.690	704.55	756.32	0.41
BLN4	35.17210	136.17180	97.780	707.45	757.49	0.48
BLN5	35.16330	136.17330	111.060	703.91	756.35	0.54
BLN6	35.16198	136.18042	125.170	701.40	756.04	0.87
BLN7	35.16300	136.18174	129.830	700.22	756.28	1.13
BLN8	35.16492	136.18096	142.950	698.65	756.73	0.91
BLN9	35.16462	136.18312	167.550	692.96	756.66	1.34
BLN10	35.16522	136.18396	204.920	685.43	756.81	1.38
BLN11	35.17246	136.18012	158.080	696.80	757.57	0.75
BLN15	35.17486	136.18228	155.850	698.04	758.14	1.15
BLN17	35.18066	136.18414	140.820	701.71	758.57	0.74
BLN18	35.16492	136.15102	87.420	703.27	756.73	0.15
BLN19	35.17096	136.15240	86.450	703.98	757.22	0.16
BLN20	35.17240	136.15360	87.090	705.63	757.56	0.16
BLN21	35.17486	136.15324	86.220	707.61	758.14	0.22

Table 1 Data format compiled in this study. St.No, LAT, LONG, HEIGHT, G-value, Nor. G-value, and T. C. are station number, latitude, longitude, height above sea level, absolute gravity value, normal gravity value and terrain correction value in case of density is 1.0 g/cm^3 respectively.

いま述べた作業の段階では、すべてデータを一枚のフロッピーディスクにいったのみであ

り、これを使用して様々なブーゲー異常図を作成するためには測定図との対応がつかねばならない。このために、収録されたデータを二万五千分の一単位に分割しておくことにした。

すでに述べたように二万五千分の一の地形図は国土地理院の第二次地域メッシュに対応しているので、そこでコード番号に従って収録されたデータをべつ々のフロッピーディスクの上に移し変えた。

3) 結果の例

これまで述べた方法に従って琵琶湖を中心とする近江平野の重力の結果をまとめた。ここで用いたデータは既発表のものは近江平野では Nishimura et al., (1966, 1967), Nishida et al., (1988), 野口 (1976), 須田 (1981), Abe and Sasajima. (1974) である。ここで Abe and Sasajima (1974) のデータは琵琶湖底のものであり、その扱いはすでに述べたように水深の補正をするために、別の扱いがなされている。このほかに近江平野の北側には未発表の測定データ (Nishida et al., 投稿中) があり、これらをあわせるならば、ほぼ滋賀県全域の重力異常図を得ることができる。なおこのほかに京都市や、大阪平野のデータもまとめあげたが、これらはいずれも独立したデータであるために、広域の重力異常図となり得ないので、ここでは省略して近江平野を例にとることにする。

a) 広域異常図

Fig.3 にはこれまでに述べた方法でえられた近江平野でのブーゲー異常図をしめしてある。この図は地殻の平均密度を 2.40 g/cm^3 としている。この密度は近江平野では第四紀の堆積物が厚く地表面を覆っており、その一方では山岳地帯には花崗岩や中古生層が分布しているためにその平均を推定したことによる。ここで等重力異常線の間隔は陸上では 2 mgal であり、湖の中では 5 mgal である。図中に L、H とあるのはそれぞれ負及び正の重力異常をしめし、また B-1、B-2、K-1 および R-1 はそれぞれこれらの地点での岩盤に到達するまでの深部掘削がおこなわれ、その基盤深度の判明している場所である。

この図からは次のようなことが指摘できる。まず重力異常の負の中心は現在琵琶湖盆の中心にあり、最も低いところは今津の東にマイナス 60 mgal に達する負異常域の中心が認められる。さらに北小松の東の琵琶湖中にも負異常の中心が認められる。大きくみるならば、琵琶湖の中軸部をとる負異常がありその東西でそれぞれブーゲー異常は増大することが指摘できる。この琵琶湖中軸部の負異常の延長は西浅井町にもみられ、さらにその北へとつずき敦賀へ向かうことがこの図から読みとれる。

つぎに南近江平野では、甲賀、信楽から北にむかってブーゲー異常が次第に減少することが認められる。いまここでこの南から北にむかってブーゲー異常の減少傾向を取り去るならば、甲賀盆地から蒲生町を通り愛知川にいたる負異常が読み取れる。Yokoyama (1969) によれば、古琵琶湖層群とよばれ近江平野に分布する鮮新更新世の堆積物を堆積させた湖盆は今から約 300 万年前に甲賀盆地に発生して、その後その形と規模を変えながら次第に北上し

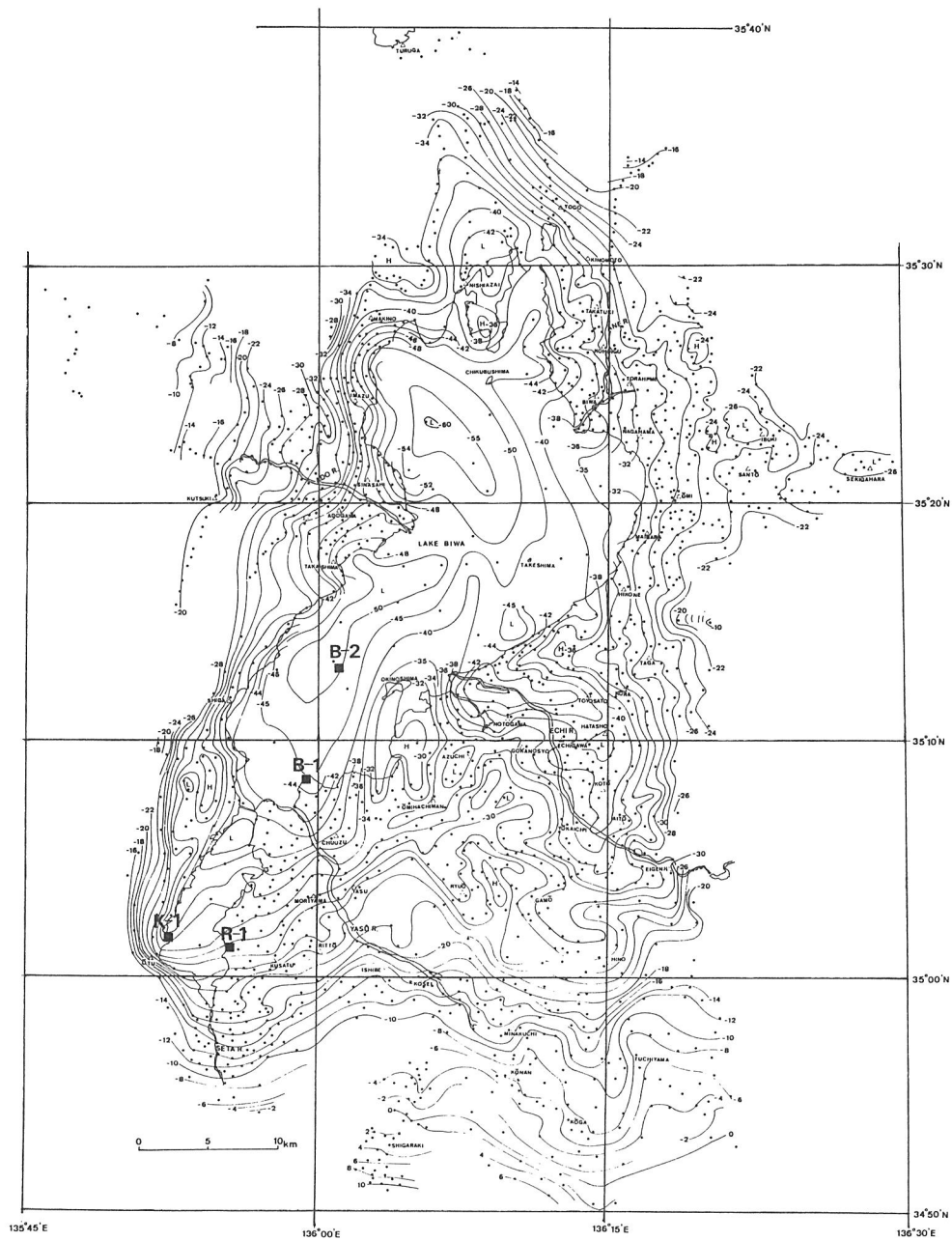


Fig. 3 Bouguer anomaly map around Oomi basin. Contour intervals are 2 mgal on land and 5 mgal in the lake. B-1, B-2, K-1 and R-1 are the locations of deep wells respectively. Assumed density is 2.40 g/cm^3

て現在の琵琶湖になっていると推定されている。ここでの周辺にたいする負の重力異常の分布はこの推定される古琵琶湖層群の湖盆の形を示すとかんがえられる。

Fig.4 には「日本の活断層」(活断層研究会編)にまとめられている近畿の活断層分布図をおなじブーゲー異常図の上に示す。この図の活断層は野外での露頭に示される活断層のみが示されていて、厚い堆積物の下の活断層は当然のこととして示されない。従って、近江盆地ではその周辺部にある断層は記載されるが、南近江平野や、琵琶湖盆地のなかでは断層がないようにみえる。しかしながらこの図に示される等重力異常線の密なところは断層の存在を示しており、これだけでは十分ではないと考えられる。

今度はおなじブーゲー異常図のうえに等重力異常線のみを根拠として断層を推定してみることにして、その結果を Fig.5 に示す。この結果を Fig.4 と比較するならば、次のようなことが推定できる。すなわち近江平野周辺の山岳地帯では断層の分布は多少の食い違いはあるにしても両者の結果にはそれほど大きな違いはない。ところが平野部や湖盆にはこれまでの活断層図にない断層線が推定できる。

実際、Horie and Tanaka (1983) の報告している琵琶湖盆でのエアガンによる探査では、湖中の堆積物が断層で切られていることが示されていることから、これらの堆積盆のなかには断層が存在することが確認できる。このことから、広域のブーゲー異常図をつくることは堆積盆地の断層構造を論ずるためにはきわめて意義のあるものと考えられる。

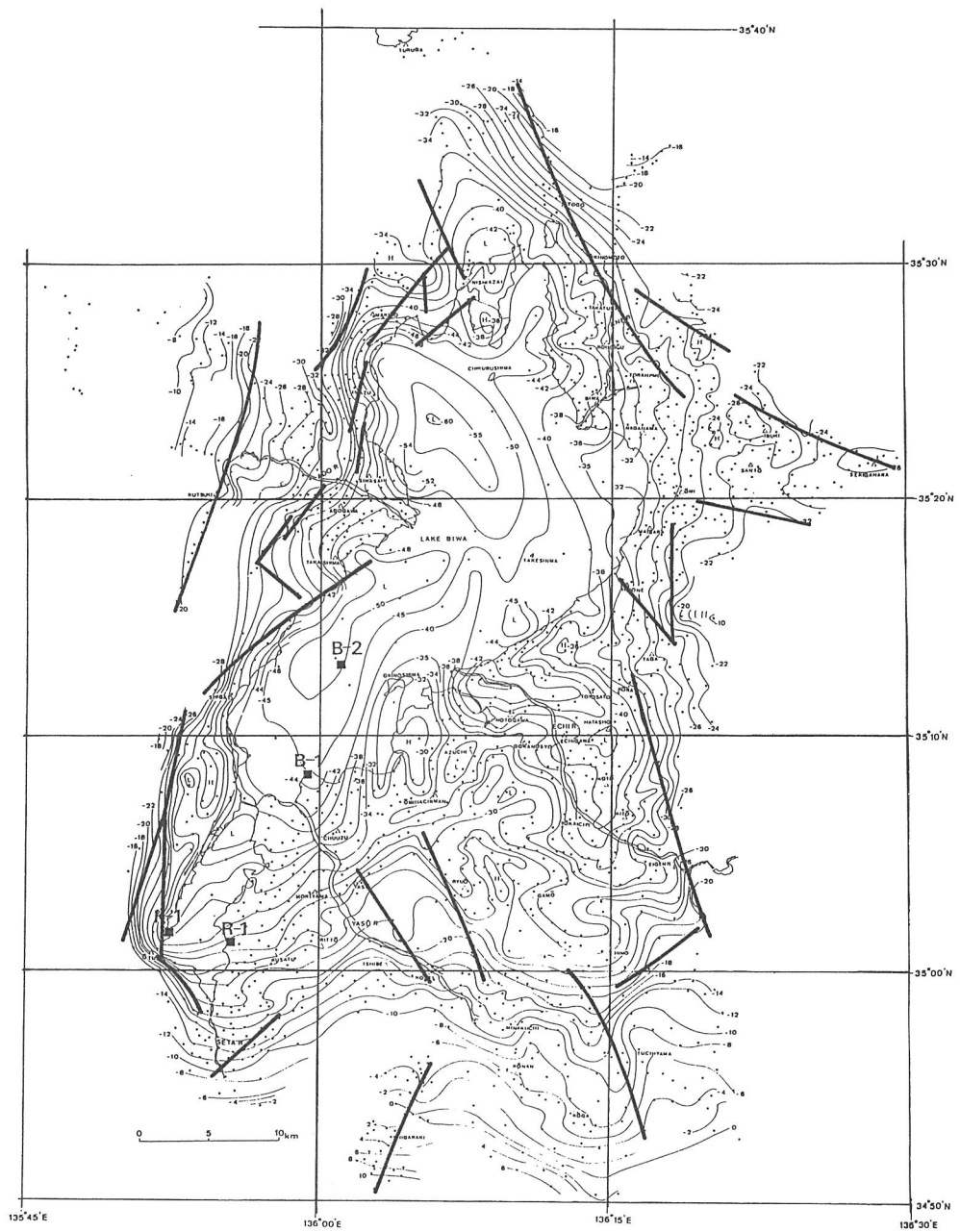
b) 狭い範囲での詳細なブーゲー異常図について

つぎにこのようなデータを収録することの利点として、必要に応じて任意の範囲の測定データを取り出して、詳細なブーゲー異常図を作り出すことが、可能になっていることがあげられる。ここでは前に述べたように測定点の緯度、経度に従って二万五千分の一の地形図ごとにデータを区分した。

ここでは例として二万五千分の一「長浜」をとりあげることにする。長浜は Fig.5 の重力異常の分布から示される推定断層図にも示されるようにその南から鈴鹿山系と平野部との境界の断層が南北にはしり、ちょうど地形図の中央部にその断層の延長がみえる。この断層の西側では琵琶湖の中心部にむかって重力異常は減少していき、その東側では大きくみるならば重力異常は増大する。

琵琶湖の北側では湖底の堆積物はきわめて若く、その密度は大きくみつもっても 2.0 g/cm^3 を越えないと考えられる。さらにこの地形図の東に分布する古生層の密度は地殻の平均の 2.67 g/cm^3 を推定しなければならないので、ここでは密度を二通りにあたえてみることにした。ひとつには極端なケースとして 1.8 g/cm^3 を、もうひとつには普通に 2.67 g/cm^3 をあたえてみた。それぞれを Fig.6 および Fig.7 に示す。ここでは等重力異常線の間隔は 1 mgal である。

いずれの図においてもブーゲー異常の基本的な形はほとんど変わらないが、絶対値で約 3 mgal 異なっている。湖岸では密度を小さくするほうがより琵琶湖の堆積物の影響を表すと



.Fig. 4 Distribution of active faults pictured on the Bouguer anomaly map in Fig. 3. Active faults in this figure are reported in "Active faults in Japan".

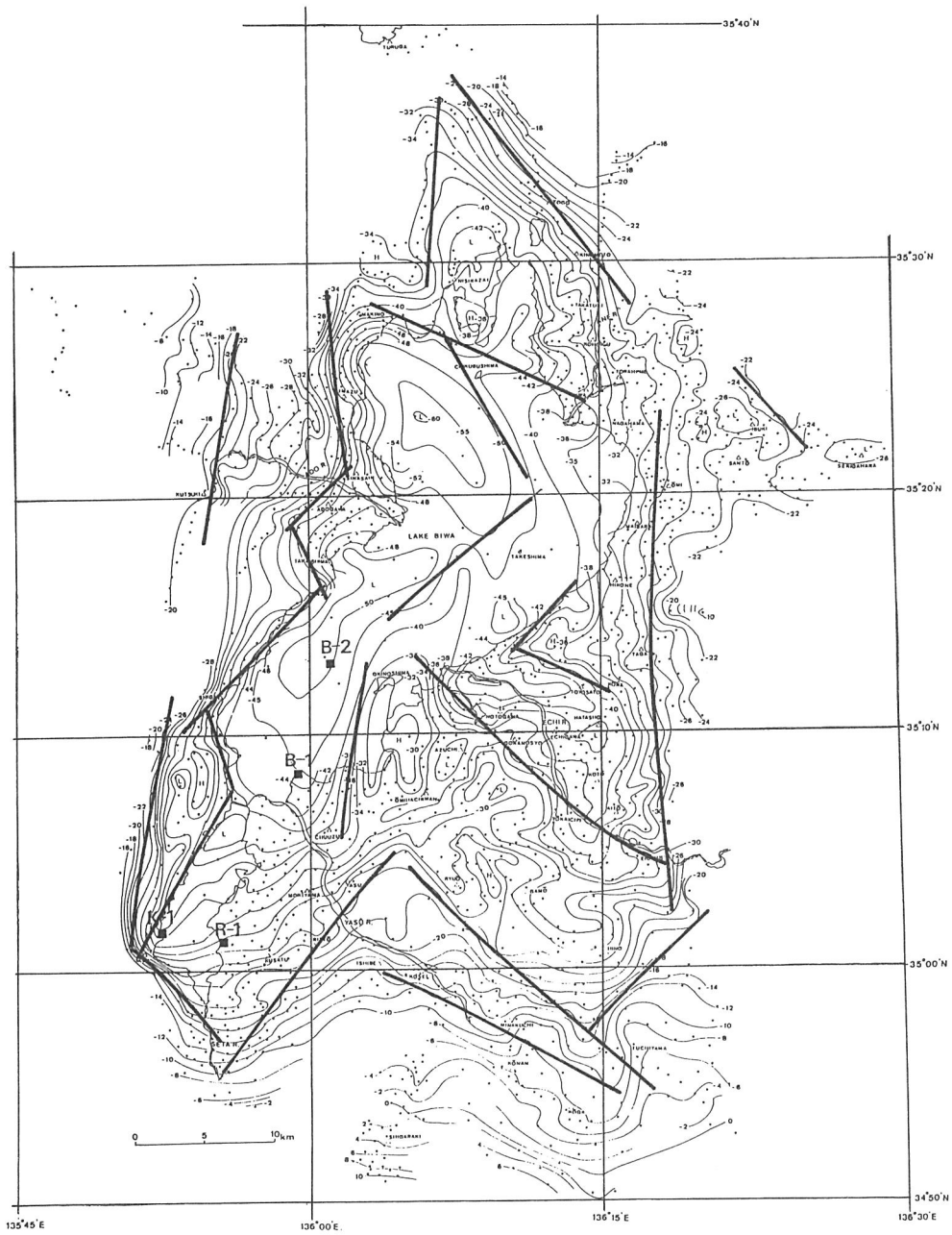


Fig. 5 Supposed active faults from the distribution of Bouguer anomaly.

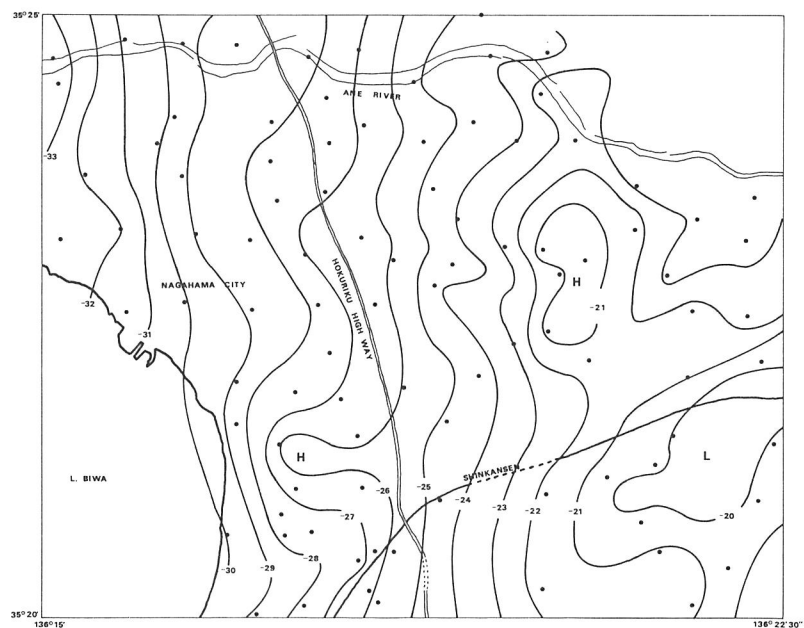


Fig. 6 Bouguer anomaly map of Nagahama 1/25,000 topographic map. Contour intervals are 1 mgal. Density is 1.8 g/cm^3 .

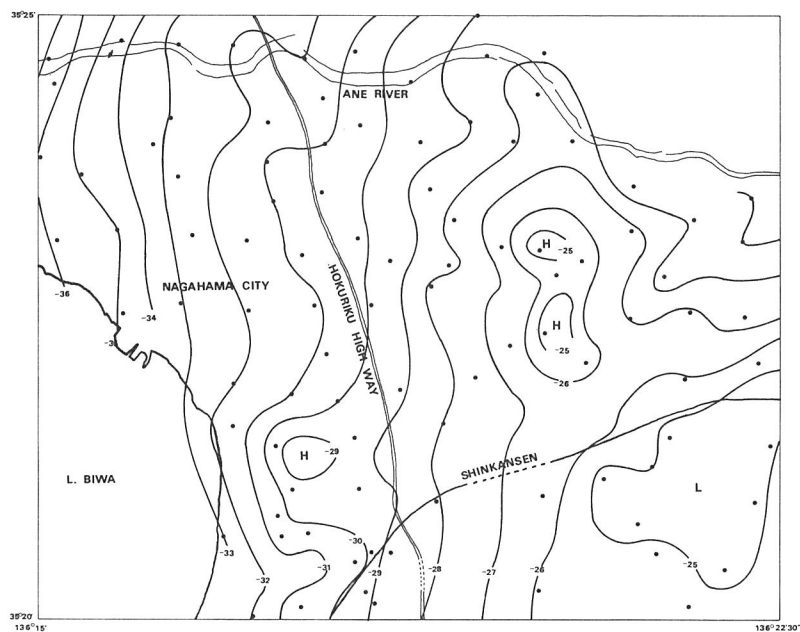


Fig. 7 Bouguer anomaly map of Nagahama. Density is 2.67 g/cm^3 .

考えられる。また図の中央を走る南北の断層は、密度 1.80 g/cm^3 で描いたときにより明瞭になる。従って、ここでは密度を小さくするほうがよいことがわかる。しかし、その一方ではより広域のブーゲー異常図と比較するためには、 2.40 ないし 2.67 g/cm^3 が適切である。

このように、狭い範囲で任意にデータを取り出した場合適切な密度での異常を作成することも可能であり、今後様々な解析に役立てることができると考えられる。

4) まとめ

近江平野を中心とする近畿地方での重力異常のデータの収録を行った。収録はすべてのデータを等しい形にまとめあげ、その結果をフロッピーディスクに記憶させておくことにより、いままで利用されなかったデータを用いて任意の密度で任意の地形図の重力異常図を作ることができる。

さらに広域の重力異常図から厚い堆積物に覆われた堆積盆地での断層の存在も推定することが可能になった。

参考文献

- Abe E. and Sasajima, S. (1974) Probable sedimentary thickness in Lake Biwa inferred from the gravity measurements, in IPPCCE News-letter, No 1, ed. Horie pp 2-3
- Banerjee, B. and Gupta, S. P. D. (1977) Gravitational attraction of a rectangular parallelepiped. *Geophysics*, vol. 42, pp. 1053-1055
- Horie, S. and Tanaka, S. (1983) On the investigation of the lake basin structure by air gun method, *Paleolimnology of Lake Biwa and Japanese Pleistocene*, Vol.11, pp 5-10
- 桂 郁雄、西田潤一、西村 進 (1987) KS110-1 標高データを用いた重力の地形補正計算プログラム。物理探査、第40巻、161-175頁
- 河野芳輝、久保昌之 (1983) メッシュ状平均標高データを用いた地形補正計算。測地学雑誌、第29巻、101-112 頁
- 小竹美子、萩原幸男 (1987) 重力球面補正の切断誤差。測地学会誌、第33巻、321-328 頁
- Nishida, J., Hashimoto, S. and Nishimura, S. (1978) A preliminary report of the gravity survey around lake Biwa, Shiga Prefecture, Japan *Paleolimnology of Lake Biwa and the Japanese Pleistocene*, Vol. 3, pp 115-145
- Nishimura, S., Nishida, J., Hashimoto, S. and Ikeda, T. (1976) Preliminary report of the gravity survey in the district of the southern part of Shiga Prefecture, Japan *Paleolimnology of Lake Biwa and the Japanese Pleistocene*, Vol. 4, pp 125-143
- Nishimura, S., Nishida, J., Hashimoto, S., Tamada, O. and Ikeda, T. (1977) Preliminary report of gravity survey in the district of the western part of Shiga Prefecture, Japan, *Paleolimnology of Lake Biwa and the Japanese Pleistocene*, Vol. 5, pp 107-123
- 野口慶一 (1976) 大津市瀬田田上地域の重力測定。京大、卒論
- 野崎京三 (1981) 球面地形補正の計算プログラム。測地学会誌、第27巻、23-32頁
- Satomura, M. (1985) Precise relative measurements of gravity in Kinki district, Japan, *Geosci. Rep. Shizuoka University*, No.11, pp 1-55
- 須田茂行 (1981) 滋賀県信楽盆地の重力探査。京大、卒論

- Yokoyama, T. (1969) Teprochronology and paleogeography of the Plio-Pleistocene in the eastern Setouchi Geologic Province, Southwest Japan, Mem. Fac. Sci., Kyoto Univ. ser. Geol. Mineral., Vol. 36, pp 19-85